

经颅直流电刺激技术作用机制及其在运动科学中的应用进展*

郭 峰¹ 鲁盼盼¹

提升运动员竞技能力的传统方法主要体现在如何提高运动员的肌肉力量和肌肉工作效率。经颅神经刺激技术可以训练人体的中枢神经系统,也有利于受试者运动能力的提升。经颅神经刺激技术在过去的几十年中得到了很大发展,在20世纪90年代后期,这种非损伤的脑刺激技术就已经被相关科研人员所熟知。经颅直流电刺激技术(transcranial direct current stimulation, tDCS)是神经刺激技术中的一种,它通过特殊的神经刺激器在大脑头皮的特定区域施加一定强度的电流刺激,从而提高大脑的工作效率。近年来,经颅直流电刺激以无创、安全和经济的突出优点,在脑损伤修复、神经疾病治疗、认知与情绪调控等领域得到了广泛应用。事实上, tDCS可能也是一种能够改变人体运动能力的无创伤技术。以往研究表明,在大脑初级运动皮质区实施 tDCS能提高健康人群和临床卒中患者复杂运动的水平。

对于运动员来说,高效的运动能力最为重要,例如:快速的肌肉爆发力,长时间的有氧耐力等。研究表明,人体进行大强度的肌肉收缩时需要充足的神经冲动^[1]。这种神经冲动是由中枢神经系统发放出来的电信号,这个电信号能够驱动运动单位募集,进而引起肌肉收缩产生肌力。而初级运动皮质区(primary motor cortex) (M1)是神经冲动发放的主要皮质区。人体在运动过程中M1持续发放神经冲动,帮助机体维持肌肉力量。

tDCS是一种无创伤的提高大脑皮质兴奋性的方法,它通过置于头皮的电极以低幅值的直流电刺激局部皮质区^[2]。电流强度通常为1—2mA,电流引起的电场变化改变了神经元静息状态,使安静状态下的神经元发生去极化或超极化,进而兴奋或抑制大脑特定区域并促进神经元冲动同步化发放。通过改变神经元的静息状态, tDCS改变了大脑局部皮质的功能。通过短期的大脑可塑性变化积累(例如:长时程增强或长时程抑制)会导致大脑功能的长期改善。例如:缩短运动技能学习的时间^[3]和提高肌肉收缩能力^[4]。

这种电刺激的结果会改变电极下局部皮质区的兴奋性,而对大脑皮质兴奋性的改变取决于刺激电极的极性。阳极

刺激诱发兴奋,阴极刺激诱发抑制效应。最初在使用 tDCS改变大脑皮质兴奋性的研究中发现,在刺激停止后,皮质兴奋性的改变会依然持续,并且这种效应会随刺激强度和刺激时间的变化而变化^[5]。

尽管 tDCS能改变人体大脑运动皮质区的兴奋性,但一个重要问题是 tDCS以什么方式应用在体育运动中,进而帮助提高运动员的运动能力。尽管已经有证据证明 tDCS对卒中患者的运动康复和健康人都是有效的,但是对运动员群体的效用尚未有充足的证据证明。目前,国内的刘宇带领团队开始关注这种神经刺激增强技术在体育运动中的应用^[6-7]。

1 tDCS在运动疲劳中的应用

神经肌肉疲劳是由中枢和外周因素引起的^[8]。尽管外周疲劳时伴随着肌肉的工作能力下降,但中枢疲劳也可能在工作能力下降中起着重要作用。这种中枢疲劳具体表现为在运动过程中中枢神经系统对肌肉的神经冲动支配能力减弱^[9],并且与脊髓运动神经元活动变化以及脊髓上位神经冲动减弱有关。Cogiamanian等^[4]探究了在运动皮质区实施 tDCS是否能够缓解受试者的疲劳。结果表明, tDCS的阳极刺激提升了大脑皮质的兴奋性。具体表现为与伪刺激对照组相比,经过 tDCS干预的受试者其疲劳程度减弱,而与阴极电刺激相比,其运动时间延长了15%。这个研究结果符合大脑皮质在疲劳运动任务中具有调节作用的事实。另外,这种现象可能与脊髓上位疲劳改变或反馈抑制系统改变有关。尽管 tDCS的刺激效应维持了几分钟而不是几个小时,但是不难看出这个技术在众多体育项目中应用的前景,尤其在体育运动中发生疲劳时,能够降低疲劳程度。

Okano等^[10]观察了优秀的自行车运动员在渐增负荷条件下蹬骑自行车的运动过程中,同时在左侧颞叶皮质(T3)处施加20min的阳极 tDCS刺激,观察对其运动能力的影响。结果发现受试者在运动过程中其峰值功率显著增加、心率降低以及次最大负荷下主观体力感觉显著降低,这表明通过

DOI:10.3969/j.issn.1001-1242.2020.07.026

*基金项目:国家自然科学基金项目(31701043);辽宁省自然科学基金项目(20180550169);辽宁省“百千万人才工程”资助项目;国家重点研发计划“科技冬奥”重点专项课题(2018YFF0300502)

1 沈阳体育学院,沈阳,110102

第一作者简介:郭峰,男,副教授;收稿日期:2018-10-29

tDCS 阳极刺激可以减轻机体的疲劳程度和疲劳感。同样, Angius 等^[11]对 9 例自行车选手的初级运动皮质区(M1)实施阳极 tDCS 刺激,同时将阴极放置在对侧的肩关节,结果发现,受试者在运动过程中的主观体力感觉等级下降并且耐力增加,但当把阴极置于前额区域时,并没有出现这种效应。Borducchi 等^[12]发现,对运动员左侧背外侧前额区皮质施加 2mA 的阳极 tDCS 刺激后,其认知能力有所提高。相反, Flood 等^[13]对受试者的感觉运动皮质区施加 tDCS 刺激后显著降低了其练习过程中的主观疲劳感。但是其肌肉耐力或肌肉最大输出能力没有发生显著性变化。另外,很多研究表明在受试者 M1 区实施阳极 tDCS 刺激后提高了其肘关节伸肌抗疲劳能力^[4,14]。

在最近一项关于运动员运动极限的研究中, Berthelot 等^[15]认为人类运动限制的关键问题就是人体在运动过程中产生的用力知觉问题,从某种程度上讲,运动过程中强烈的疲劳感使人体的运动能力减弱。而现在我们可以通过 tDCS 刺激使人体的主观用力知觉减轻,进而提高人体的耐力^[16]。

2 tDCS 在改善肌肉力量中的应用

为了让运动员达到较高的运动水平,学者们已经开始使用一些直接或间接的方法改变大脑的活动,进而帮助提高运动员的肌肉收缩能力。这些方法包括:冥想训练和视觉刺激^[17]、针刺法^[18]。研究表明这些方法都可以产生中枢效应^[19]。还有其他一些方法,例如:通过音乐降低躯体的用力知觉^[20],通过心理学方法提高运动员的动机水平或通过安慰剂产生心理学效应^[21]。但是这些方法并不是对所有的运动项目都有效。事实上, tDCS 也可以作为一种有效地提高运动员运动能力的辅助工具。

有研究观察了 tDCS 对受试者肌肉力量的影响。Tanaka 等^[22]发现,健康成年人经过 30 min 的阳极 tDCS 刺激后,下肢腿部内收肌力量出现了瞬时增加,这与以往 tDCS 刺激对手指肌力影响的研究结果相近^[23-25]。Tanaka 等^[26]研究发现对股四头肌轻度瘫痪患者的运动皮质区施加阳极 tDCS 刺激后,其膝关节伸肌肌力增加了 13.2%,但持续效应不到 30min。Cogiamanian 等^[4]在健康受试者的右侧运动皮质区分别实施阳极 tDCS 刺激、阴极 tDCS 刺激以及对照无刺激,观察对受试者左侧肘关节伸肌耐力的影响,结果发现阳极 tDCS 刺激显著提高了肘关节伸肌的耐力。另外, Dutta 等^[27]也做了关于阳极 tDCS 刺激大脑运动皮质区对肘关节伸肌效果的影响的研究,其研究结果与 Cogiamanian 等^[4]相近。这些实验支持了阳极 tDCS 刺激能改变大脑皮质兴奋性,进而改变神经驱动假设。另外,神经冲动增强与力量形成速率(Rate of force development, RFD)有密切联系^[28]。RFD 也称作肌肉爆发力,将其定义为形成峰值力矩的速率^[28]。对于运动员来

说,它是一个非常重要的力量评价指标,因为一个动作的快速执行与肌肉的快速收缩密切相关。以前的研究结果表明 tDCS 诱发大脑皮质 M1 区兴奋性改变,能够提高肌肉的输出功率,出现这种情况的潜在机制是 M1 皮质区兴奋性增加而提高对运动单位的快速募集^[27]。

目前,也有一些研究结果不一致,例如: Abdelmoula 等^[29]和 Kan 等^[30]都对受试者初级运动皮质区(M1)施加了阳极 tDCS 刺激并观察对肘关节伸肌的影响,结果两者得到的结论相反。Abdelmoula 等发现经过 tDCS 刺激后肘关节伸肌的肌力增加,而 Kan 等发现肘关节伸肌的肌力没有显著性变化。

tDCS 作为一种提高肌肉力量的辅助工具,在运动科学领域里的应用具有一定的潜力。但是需要进一步研究其影响因素。例如:刺激强度、刺激作用时间。另外,还要进一步弄清楚为什么在有些项目中有效应,而在另外一些运动项目中作用效果不明显。尽管很多研究表明在 M1 区施加 tDCS 刺激能够提高人体在多种运动任务中的运动能力,但是目前有关 tDCS 对人体肌肉爆发力影响的研究很少。

3 tDCS 在提高运动技能中的应用

精细运动技能学习对于完成日常活动和特定的运动具有重要的作用,例如,演奏乐器或运动技能,运动技能学习是通过训练使运动动作完成的更快速和精确的过程,而初级运动皮质区(M1)在精细运动技能学习过程有重要作用^[31]。tDCS 已经被证明能够提高 M1 的兴奋性^[32]。以前的研究也表明在 M1 区施加 tDCS 能够显著提高多肌肉群参与的复杂运动的水平。例如: Hummel 等^[33]发现在健康右利手受试者左侧 M1 区进行阳极 tDCS 电刺激后,其 Jebsen Taylor Test 水平显著增高。Jebsen Taylor Test 是一种评价人体日常生活中手部功能动作灵活性和速度的测试^[33]。在这项研究中,受试者在 tDCS 刺激过程中,刺激后即刻,以及刺激后 30min,受试者一直能够保持良好的刺激效应。在另外一项研究中^[34],对脑卒中 M1 区进行阳极 tDCS 刺激后,提高了其进行简单手部运动任务过程中的最大力量及其反应速度。Water-Metenier 等^[35]研究发现采用双侧 tDCS 同时刺激双侧 M1 区时,能够显著提高受试者的行为学能力,他们认为其原因是,在 M1 区同时实施双侧刺激时,兴奋一侧大脑半球的同时抑制对侧大脑半球,另外,双侧大脑半球 tDCS 刺激也可能阻止了大脑半球间的抑制效应,例如,优势侧运动皮质区过强的活动影响非优势侧运动皮质区功能的改变。

Vines 等^[31]和 Cuyper 等^[36]设计了一种实验,该实验需要受试者在给定的时间内尽可能快地完成一系列按照顺序敲击键盘的任务,结果发现在受试者经过 tDCS 刺激后提高了其顺序测试中的运动表现能力。另外,在 Hummel 等^[37]的研

究中,对老年受试者左侧M1进行阳极tDCS刺激后,发现这些老年人的日常生活技能得到了极大提高。实际上,在很多运动技能研究中,受试者在tDCS刺激后即刻,几小时或者几天后依旧表现出良好的刺激效应。例如,Reis等^[38]对正常受试者的初级运动皮质区进行连续五天的阳极刺激后,结果发现其运动技能得到显著提高,而且这种效应持续了三个月。

目前,还有其他的一些研究集中在tDCS对成年人的运动学习能力的影响。例如,Stagg等^[39]研究发现,对于健康成年人来说,在复杂运动技能学习过程中实施tDCS刺激,结果提高了受试者完成复杂运动任务的能力,阳极电刺激提高运动能力,阴极电刺激降低学习速率。有趣的是,在运动任务之前,无论使用哪种极性刺激,施加刺激会使运动表现力更差。这说明采用tDCS刺激的先后顺序似乎很重要^[39]。与Stagg等的研究结果相似,Kuo等^[40]发现在执行运动任务之前施加阳极tDCS刺激使运动学习能力下降,然而在运动后施加tDCS刺激导致运动学习能力提高^[41]。这提示如果要提高运动员的运动能力,就要避免在运动任务执行之前进行tDCS刺激。

目前,tDCS还应用在了美国奥运会滑雪队^[42]、顶级的NBA球队^[43]以及电子游戏玩家^[44]。这些研究表明,通过使用tDCS刺激提高了受试者的运动机能。很显然,tDCS在影响运动技能形成过程中有潜在的作用,但是如何让tDCS刺激产生的良好效应持续较长时间显得尤为重要,这需要精细的实验设计来验证。

4 tDCS的作用机制

在最近的几年中,学者们开始探究tDCS的生理学机制。从目前的研究结果来看,运动皮质区特别是控制手部运动的初级运动皮质区(M1)通常被作为一个研究模型去探究tDCS引起的大脑皮质兴奋性变化的机制。其原因是M1区位于中央前回与头皮表面的距离最短,这样很容易接收到电流脉冲的刺激。所以,目前关于tDCS的生理机制研究几乎全部来自于人体的运动皮质区。

对于tDCS刺激引起的急性效应,学者们认为是由于直流电刺激改变了神经元细胞的静息电位水平。在动物实验中发现,阳极刺激导致神经元细胞膜进行电位去极化,然而阴极刺激导致神经元细胞静息电位超极化^[45-46]。实际上,这种对神经细胞静息电位的极化或去极化的影响取决于刺激电流方向与神经元细胞位置的关系。在人体实验研究中发现,阳极刺激引起大脑运动皮质兴奋,阴极刺激引起大脑运动皮质抑制。研究发现,当使用特殊的方法抑制神经元细胞膜上的钠离子和钙离子电压门控通道的活性时,tDCS的刺激效应明显减弱。而当抑制 γ -氨基丁酸(GABA)或N-甲基天冬氨酸(NMDA)受体时,并没有影响tDCS刺激后出现的

急性效应^[2]。这说明tDCS引起的效应主要与神经元细胞的膜电位有关而与突触联系没有关系。

目前很多研究发现,tDCS刺激后的效应维持的时间会超过tDCS刺激的时间,对于tDCS刺激引起的这种后效应^[5],很多学者认为是由于tDCS刺激引起了大脑皮质可塑性。因为学者们研究发现,当抑制在突触可塑性中发挥重要作用的N-甲基天冬氨酸受体的活性时,tDCS产生的后效应减弱,而当使用N-甲基天冬氨酸受体激活剂环丝氨酸时,tDCS产生的后效应增强^[2]。这说明tDCS刺激产生的长时间后效应与谷氨酸能系统的突触可塑性有关。动物实验研究进一步发现,阳极tDCS刺激增加了神经元细胞膜上钙离子通道的数量^[47],而钙离子通道的数量和活性与谷氨酸能系统的突触可塑性密切相关。

除了在tDCS刺激电极下局部发生了生理学效应外,在距离刺激局部一定距离的其他脑区或者皮质下区域也发生了生理学效应。但是不清楚这些效应是由皮质活动的生理性扩散引起的还是由电流扩散引起的。例如,有学者研究发现在前运动皮质区施加阳极tDCS刺激后提高了M1皮质区内的易化过程,这可能是由于前运动皮质区-初级运动皮质区传入成分激活引起的^[48]。另外,还有研究发现在M1区施加阳极tDCS刺激后,通过fMRI发现控制一侧手部运动的M1区与控制另一只手运动的前运动皮质区和顶上皮质区之间的功能性联系增强了^[49]。这些研究成果表明tDCS刺激引起的良好效应可能与tDCS刺激引起大脑不同皮质区域之间的功能联系增强有关。

实际上,在今后的研究中还需要采用多种研究方法来探究tDCS产生生理学效应的机制,例如:运动诱发电位测量、神经网络连接、EEG技术以及fMRI。

5 tDCS在运动科学研究中的展望

总体来看,如果恰当地使用tDCS技术,tDCS能够促进运动员运动能力的提高。具体表现在:①能够延长受试者的运动时间,其作用机制是tDCS降低了机体对疲劳反映的敏感性;②提高肌肉力量,尤其是肌肉爆发力;③提高运动技能的学习效率。但是,目前大部分支持这种观点的证据仅仅来自于普通个体而并没有来自于高水平的运动队运动员。另外,对于一些运动技能的研究仅仅涉及简单的手指敲击按键技能,尚未有研究考察tDCS对运动员学习复杂专项技能的影响。尽管已经证明tDCS能够在各种不同的运动任务中提高运动水平,但目前tDCS的操作受到限制。例如,tDCS只能在实验室中进行操控,而且操作者需要经受过严格的培训才能够保证安全操控tDCS。实际上,在人体运动中的应用以及在体育运动中的推广都受到了限制。目前,一项最新的便携式tDCS刺激器Halo Sport被研发,该设备可以在运动场

地使用。这种便携式经颅直流电刺激仪具有使用安全、自动精准等性能,能够保证运动训练与经颅直流电刺激同时进行,从而实现最大效率地提高运动员的竞技能力。

目前,对于研究学者来说,最大的挑战是确定tDCS在现实竞技体育中的有效性以及评价重复性地使用tDCS的安全性问题。另外,还要验证tDCS在实验室条件与运动场地之间,优秀运动员与非运动员之间,肌肉爆发力与耐力之间,提高上肢肌肉能力与改善下肢肌肉能力之间,使用时的效果差异。同时,还有一个重要提示,在使用tDCS技术提高运动成绩时还要考虑伦理道德问题。当这个技术被应用到竞技体育中时,通过这种外源性手段提高运动成绩,是否是一种违背体育道德的行为。

参考文献

- [1] Folland JP, Buckthorpe MW, Hannah R. Human capacity for explosive force production: Neural and contractile determinants[J]. Scand J Med Sci Sports, 2015, 24(6):894—906.
- [2] Nitsche MA, Liebetanz D, Lang N, et al. Safety criteria for transcranial direct current stimulation (tDCS) in humans[J]. Clinical Neurophysiology, 2003, 114(11):2220—2222.
- [3] Nitsche MA, Kuo M, Paulus W, et al. Transcranial direct current stimulation: Protocols and physiological mechanisms of action[M]. Textbook of Neuromodulation, 2015.
- [4] Cogiamanian F, Marceglia S, Ardolino G, et al. Improved isometric force endurance after transcranial direct current stimulation over the human motor cortical areas[J]. European Journal of Neuroscience, 2010, 26(1):242—249.
- [5] Nitsche MA, Paulus W. Sustained excitability elevations induced by transcranial DC motor cortex stimulations in humans[J]. Journal of Physiology, 2000, 527(3):633—639.
- [6] 王开元,刘宇. “神经启动”技术增强运动表现[J]. 体育科学, 2018, 38(1):96.
- [7] 卞秀玲,王雅娜,王开元,等. 经颅直流电刺激技术及其在提升运动表现中的应用[J]. 体育科学,2018, 38(5):66—72.
- [8] Gandevia SC. Spinal and supraspinal factors in human muscle fatigue[J]. Physiological Reviews, 2001, 81(4):1725—1789.
- [9] Taylor JL, Todd G, Gandevia SC. Evidence for a supraspinal contribution to human muscle fatigue[J]. Clinical & Experimental Pharmacology & Physiology, 2010, 33(4):400—405.
- [10] Okano AH, Fontes EB, Montenegro RA, et al. Brain stimulation modulates the autonomic nervous system, rating of perceived exertion and performance during maximal exercise [J]. British Journal of Sports Medicine, 2015, 49(18):1213.
- [11] Angius L, Pageaux B, Hopker J, et al. Transcranial direct current stimulation improves isometric time to exhaustion of the knee extensors[J]. Neuroscience, 2016, 339:363—375.
- [12] Borducchi DM, Gomes JS, Akiba H, et al. Transcranial Direct Current Stimulation Effects on Athletes' Cognitive Performance: An Exploratory Proof of Concept Trial[J]. Frontiers in Psychiatry, 2016, 7(3):183.
- [13] Flood A, Waddington G, Keegan RJ, et al. The effects of elevated pain inhibition on endurance exercise performance [J]. PeerJ, 2017, 5(3):e3028.
- [14] Williams PS, Hoffman RL, Clark BC. Preliminary evidence that anodal transcranial direct current stimulation enhances time to task failure of a sustained submaximal contraction [J]. Plos One, 2013, 8(12):e81418.
- [15] Berthelot G, Sedeaud A, Marck A, et al. Has athletic performance reached its peak?[J]. Sports Medicine, 2015, 45(9): 1263—1271.
- [16] Marcelo VC, Massaru ON, Henrique B, et al. Improving cycling performance: transcranial direct current stimulation increases time to exhaustion in cycling[J]. PloS One, 2015, 10(12):e0144916.
- [17] Rich TA, Pfister R, Alton J, et al. Assessment of cardiovascular parameters during meditation with mental targeting in varsity swimmers[J]. Evidence-Based Complementary and Alternative Medicine,2016,(2):1—5.
- [18] Ahmedov S. Ergogenic effect of acupuncture in sport and exercise: a brief review[J]. Journal of Strength & Conditioning Research, 2010, 24(5):1421.
- [19] Zhu B, Wang Y, Zhang G, et al. Acupuncture at KI3 in healthy volunteers induces specific cortical functional activity: an fMRI study[J]. BMC Complementary and Alternative Medicine,2015, 15(1):361.
- [20] Mohamed J, Hamdi C, Asma A, et al. The effects of music on high-intensity short-term exercise in well trained athletes[J]. Asian Journal of Sports Medicine, 2012, 3(4):233—238.
- [21] Sabino-Carvalho JL, Lopes TR, Freitas TO, et al. Effect of ischemic preconditioning on endurance performance does not surpass placebo[J]. Med Sci Sports Exerc, 2017, 49(1): 124.
- [22] Tanaka S, Hanakawa T, Honda M, et al. Enhancement of pinch force in the lower leg by anodal transcranial direct current stimulation[J]. Experimental Brain Research, 2009, 196(3):459—465.
- [23] Fregni F, Boggio PS, Mansur CG, et al. Transcranial direct current stimulation of the unaffected hemisphere in stroke patients[J]. Neuro Report, 2005, 16(9):446.
- [24] Hummel F, Celnik P, Giraux P, et al. Effects of non-invasive cortical stimulation on skilled motor function in chronic stroke[J]. Dkgest of the World Latest Medical Informa-

- tion, 2005, 87(10):490—499.
- [25] Boggio PS, Castro LO, Savagim EA, et al. Enhancement of non-dominant hand motor function by anodal transcranial direct current stimulation[J]. *Neuroscience Letters*, 2006, 404(1):232—236.
- [26] Tanaka S, Takeda K, Otaka Y, et al. Single session of transcranial direct current stimulation transiently increases knee extensor force in patients with hemiparetic stroke[J]. *Neurorehabilitation & Neural Repair*, 2015, 25(25):565—569.
- [27] Dutta A, Krishnan C, Kantak SS, et al. Recurrence quantification analysis of surface electromyogram supports alterations in motor unit recruitment strategies by anodal transcranial direct current stimulation[J]. *Restor Neurol Neurosci*, 2015, 33(5):663—669.
- [28] Aagaard P, Simonsen EB, Andersen JL, et al. Increased rate of force development and neural drive of human skeletal muscle following resistance training[J]. *Journal of Applied Physiology*, 2002, 93(4): 1318—1326.
- [29] Abdelmoula A, Baudry S, Duchateau J. Anodal transcranial direct current stimulation enhances time to task failure of a submaximal contraction of elbow flexors without changing corticospinal excitability[J]. *Neuroscience*, 2016, 322:94—103.
- [30] Kan B, Dundas JE, Nosaka K. Effect of transcranial direct current stimulation on elbow flexor maximal voluntary isometric strength and endurance[J]. *Applied Physiology Nutrition & Metabolism*, 2013, 38(7):734—739.
- [31] Vines BW, Cerruti C, Schlaug G. Dual-hemisphere tDCS facilitates greater improvements for healthy subjects' non-dominant hand compared to uni-hemisphere stimulation[J]. *Bmc Neuroscience*, 2008, 9(1):1—7.
- [32] Nitsche MA, Seeber A, Frommann K, et al. Modulating parameters of excitability during and after transcranial direct current stimulation of the human motor cortex[J]. *Journal of Physiology*, 2005, 118(4):e79—e80.
- [33] Hummel FC, Heise K, Celnik P, et al. Facilitating skilled right hand motor function in older subjects by anodal polarization over the left primary motor cortex[J]. *Neurobiology of Aging*, 2010, 31(12):2160—2168.
- [34] Hummel FC, Voller B, Celnik P, et al. Effects of brain polarization on reaction times and pinch force in chronic stroke[J]. *BMC Neuroscience*, 2006, 7(1):73.
- [35] Waters-metenier S, Husain M, Wiestler T, et al. Bihemispheric transcranial direct current stimulation enhances effector-independent representations of motor synergy and sequence learning[J]. *Journal of the Society for Neuroscience*, 2014, 34(3):1037—1050.
- [36] Cuyppers K, Leenus DJ, Fe VDB, et al. Is motor learning mediated by tDCS intensity?[J]. *PloS One*, 2013, 8(6): e67344.
- [37] Hummel FC, Heise K, Celnik P, et al. Facilitating skilled right hand motor function in older subjects by anodal polarization over the left primary motor cortex[J]. *Neurobiology of Aging*, 2010, 31(12):2160—2168.
- [38] Reis J, Schambra HM, Cohen LG, et al. Noninvasive cortical stimulation enhances motor skill acquisition over multiple days through an effect on consolidation[J]. *Proc Natl Acad Sci USA*, 2009, 106(5):1590—1595.
- [39] Stagg CJ, Jayaram G, Pastor D, et al. Polarity and timing-dependent effects of transcranial direct current stimulation in explicit motor learning[J]. *Neuropsychologia*, 2011, 49(5): 800—804.
- [40] Kuo MF, Unger M, Liebetanz D, et al. Limited impact of homeostatic plasticity on motor learning in humans[J]. *Neuropsychologia*, 2008, 46(8):2122—2128.
- [41] Tecchio F, Zappasodi F, Assenza G, et al. Anodal transcranial direct current stimulation enhances procedural consolidation[J]. *Journal of Neurophysiology*, 2010, 104(2):1134—1140.
- [42] Reardon S. 'Brain doping may improve athlete' performance [J]. *Nature*, 2016, 531:283—284.
- [43] Mansfield A. Do the warriors owe some of their success to these "Brain-Zapping" headphones. Available online at: <https://www.businessinsider.in/Part-of-the-Warriors-training-involves-controversial-brain-zapping-headphones/articleshow/52771983.cms>. 2016.
- [44] Jarrett C. Read This Before Zapping Your Brain Online. Available online at: <https://www.wired.com/2014/01/read-zapping-brain>. 2016.
- [45] Purpura DP, Mcmurtry JG. Intracellular activities and evoked potential changes during polarization of motor cortex[J]. *Journal of Neurophysiology*, 1965, 28(28):166—185.
- [46] Creutzfeldt OD, Fromm GH, Kapp H. Influence of transcranial d-c currents on cortical neuronal activity[J]. *Experimental Neurology*, 1962, 5(6):436—452.
- [47] Islam N, Aftabuddin M, Moriwaki A, et al. Increase in the calcium level following anodal polarization in the rat brain[J]. *Brain Research*, 1995, 684(2):206.
- [48] Boros K, Poreisz C, Münchau A, et al. Premotor transcranial direct current stimulation (tDCS) affects primary motor excitability in humans[J]. *European Journal of Neuroscience*, 2010, 27(5):1292—1300.
- [49] Polanía R, Paulus W, Antal A, et al. Introducing graph theory to track for neuroplastic alterations in the resting human brain: a transcranial direct current stimulation study[J]. *Neuroimage*, 2011, 54(3):2287—2296.